

ANÁLISIS DEL GRADIENTE EDÁFICO EN LA REGIÓN ANDINOPATAGÓNICA

JUAN JOSÉ GAITÁN* & CARLOS RODOLFO LÓPEZ

INTA, EEA Bariloche, Área de Investigación de Recursos Naturales. C.C. 277 - S.C. de Bariloche (8400) Río Negro-Argentina.
*jgaitan@bariloche.inta.gov.ar

Recibido: 23/11/06

Aceptado: 26/02/07

RESUMEN

Se analizaron las relaciones entre la ubicación geográfica, precipitación media anual y nueve variables edáficas de 95 perfiles de suelos de origen volcánico distribuidos a lo largo de la región Andina de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut. Con las variables edáficas correspondientes a dos profundidades (0-20 cm y 30-60 cm) se realizó un análisis de cluster que permitió agrupar a los perfiles en cinco grupos principales. Se realizó un análisis de componentes principales y se observó que los grupos se diferenciaron a lo largo del eje 1. Este eje se relaciona con la longitud. Desde los suelos de régimen xérico de estepa ubicados en el este de la región hacia los suelos de régimen údico de bosque ubicados en el oeste, se incrementa el pH (NaF), la concentración de carbono orgánico y la capacidad de retención hídrica y disminuye, el pH (H₂O), el pH (KCl) y la densidad aparente.

Palabras clave. Propiedades físicas, propiedades químicas, Andisoles.

ANALYSIS OF SOIL GRADIENT IN ANDEAN PATAGONIA REGION

ABSTRACT

The relationships among location, mean annual precipitation and nine edaphic variables were studied for 95 profiles of volcanic soils throughout the Andean Region of the provinces of Neuquen, Rio Negro and Chubut. A cluster analysis conducted with the edaphic variables at two depths (0-20 cm and 30-60 cm) indicated five main groups. Principal component analysis (PCA) allowed to differentiate the groups for the axis 1. This axis was positively related to longitude, indicating an increase of pH (NaF), organic C and water retention capacity, and a decrease of pH (H₂O), pH (KCl) and bulk density from the xeric steppe soils at east to the udic forest soils at west.

Key words. Physical properties, chemical properties, Andisols.

INTRODUCCIÓN

Los suelos de origen volcánico representan menos del 1% de la superficie terrestre. Besoain (1985) señala que más del 75% del vulcanismo actual se concentra en los contactos convergentes entre placas litosféricas, en consecuencia los suelos originados a partir de cenizas volcánicas se distribuyen en los alrededores de dichos contactos. Los suelos de origen volcánico poseen una serie de propiedades particulares (elevada capacidad de retención de humedad, baja densidad aparente, alta capacidad de retención de fósforo, alto contenido de carbono orgánico) que los diferencian de los suelos originados a partir de otros materiales. Estas propiedades están

dadas por la existencia de minerales de tipo aluminosilicatos no cristalinos en la fracción arcilla, principalmente alófono, imogolita, ferrihidrita y complejos humus-aluminio (Besoain, 1985; Shoji *et al.*, 1993).

En la Cordillera de los Andes austral, entre los paralelos 36° y 44° de latitud sur, se ubica una serie de volcanes, especialmente del lado chileno, de los cuales unos 50 están en actividad o han tenido alguna erupción en épocas históricas (Besoain, 1985). La existencia de vientos predominantes del oeste ha producido una distribución de material volcánico desde Chile hacia la región Andinopatagónica de Argentina. Esto ha determinado que la mayor parte de los suelos de esta región sean derivados de cenizas volcánicas y clasificados como Andi-

soles de acuerdo a la U.S. Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Estos suelos representan aproximadamente 4 millones de hectáreas de la región Andina de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut (del Valle, 1998). El marcado gradiente de precipitaciones en sentido oeste-este (Muñoz, 1985) ha condicionado la evolución de estos suelos imprimiendo características diferenciales en sus propiedades (Colmet Daage *et al.*, 1988).

Una de las principales contribuciones al conocimiento de estos suelos fueron los estudios realizados en el marco del Proyecto de Cooperación entre la Argentina y Francia (INTA-ORSTOM), que comprendieron aspectos de relevamiento, génesis y potencial forestal (López *et al.*, 1993; Colmet Daage *et al.*, 1995). Sin embargo, una parte importante de información generada en este proyecto permanece aún inédita. Recientemente Broquen *et al.* (2004; 2005) analizaron las propiedades físicas y químicas de suelos derivados de cenizas volcánicas en una secuencia bioclimática del sudoeste de la provincia de Neuquén. Estudios de casos, como estos, permiten obtener una buena caracterización local e inferir ciertas tendencias pero no extrapolar sus resultados a nivel regional. Por lo tanto, a fin de generalizar los resultados, es necesario ampliar estos análisis con datos de otros sectores que abarquen un rango de variabilidad mayor y representativo de la región.

El objetivo del presente trabajo es analizar las propiedades físicas y químicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la región Andinopatagónica utilizando datos de los relevamientos realizados durante el proyecto INTA-ORSTOM en las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se analizaron datos de suelos provenientes de relevamientos realizados entre los años 1985-1987 en el marco del convenio INTA-ORSTOM de Francia en el área comprendida entre 36° 50' y 45° 00' de latitud sur y 70° 40' y 72° 00' de longitud oeste. El área presenta un marcado gradiente biofísico en sentido oeste-este dado por el efecto de la presencia de la cordillera de los Andes que actúa como una barrera a la penetración de las masas de aire cargadas de humedad procedentes del Océano Pacífico. Estos vientos ascienden por la ladera Occidental descargando su humedad, principalmente, en el sector chileno y al descender por la ladera Oriental del sector argentino se observa una rápida disminución de las precipitaciones (de 3.000 a 300 mm/año) en una distancia de aproximadamente 100 km (Muñoz, 1985). Las temperaturas medias anuales se encuentran entre 8 °C y 10 °C. La vegetación

está caracterizada por las fisonomías de bosque y matorral, sobresaliendo una conífera (*Austrocedrus chilensis*) y varias especies del género *Nothofagus* (*N. dombeyi*, *N. pumilio* y *N. antarctica*). Hacia el este de la isohieta de 800 mm la vegetación corresponde a un mosaico, con predominio de estepas gramíneas como *Stipa speciosa* y *Festuca pallescens* e intrusiones del bosque en forma de isletas. El relieve de esta región fue modelado por la acción glaciaria y luego cubierto por cenizas procedentes de volcanes ubicados en Chile durante el período Holoceno. En el sector oeste del área dominan suelos Andisoles de régimen de humedad údico y cuya secuencia de horizontes típica es A-Bw-C (pertenecientes a los Grandes Grupos Hapludantes, Udivitrandes y Fulvudantes), hacia el este dominan suelos de transición Andisoles a Molisoles de régimen xérico, con secuencia de horizontes A-AC-C o A-Bt-C (pertenecientes a los Grandes Grupos Vitrixerandes, Haploxeroles y Argixereroles).

Datos analizados

Se analizaron 95 perfiles para los que se contaba con los siguientes datos a dos profundidades (0-20 y 30-60 cm): pH por potenciometría con electrodo de vidrio en H₂O (1: 2,5 v/v), KCl 1 N (1: 2,5 p/v) (Jackson, 1964) y NaF 1 N (1:50 v/v) (Fieldes y Perrot, 1966) carbono orgánico (Corg) por el método de combustión húmeda de Walkey y Black (1934); densidad aparente (Dap) por método del cilindro y capacidad de retención hídrica a 0,033 MPa (RHcc) y 1,50 Mpa (RHmp) con olla y membrana de presión, respectivamente. Además se contó con 65 datos de aluminio (Al₀) y hierro (Fe₀) extraídos con oxalato de amonio ácido y 94 datos de retención de fosfatos (RP) de acuerdo al método de Blakemore *et al.* (1981) procedentes de muestras tomadas a diferentes profundidades (estas variables no fueron incluidas en los análisis de clasificación y ordenación que se comentan en el apartado siguiente).

Cada perfil fue ubicado mediante sus coordenadas geográficas y se estimó la precipitación media anual (PMA) del sitio de acuerdo a registros locales (estaciones meteorológicas, localidades, estancias, etc.) y ajustadas en base a su ubicación en la carta de isohietas de Barros *et al.* (1983).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de cluster con las propiedades edáficas utilizando la distancia euclídea como medida de disimilitud y el método de Ward como criterio de agrupación. Este análisis permitió diferenciar 5 grupos de suelos cuyas propiedades fueron posteriormente comparadas mediante análisis de varianza. Cuando las diferencias entre grupos fueron significativas ($p < 0,05$), las medias se compararon mediante el test de Tukey. Se realizó un análisis de componentes principales que permitió ordenar los perfiles en los ejes que explicaron la mayor variación de los datos (eje 1 y eje 2). Este análisis permitió identificar los principales gradientes edáficos, las variables edáficas más asociadas a los mismos y determinar si los grupos definidos se diferenciaron a lo largo de tales gradientes.

Se estudió la relación entre el gradiente principal (dado por el eje 1) y la longitud mediante análisis de regresión. La relación entre las propiedades edáficas, la posición y la precipitación media anual de los sitios fue analizada mediante la matriz de correlación de Pearson y análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación y ordenación

De acuerdo al análisis de cluster se definieron cinco Grupos de suelos (Figura 1) cuyas características se resumen en la Tabla 1. En la Figura 2 se muestra la distribución de los perfiles, de acuerdo a su grupo de pertenencia, en los primeros dos ejes del análisis de componentes principales. Los perfiles de los distintos grupos se separaron a lo largo del eje 1 que explicó una alta proporción (56%) de la variación total. Los grupos no se diferenciaron en el eje 2 que explicó una proporción menor (12,4%) de la variación total, esto indicaría que existe un gradiente edáfico principal asociado al eje 1. Ninguna variable se diferenció marcadamente del resto por el grado de asociación con el eje 1 (Tabla 2). El gradiente edáfico

está dado por un contraste entre pH (NaF), Corg, RHcc y RHpmp, que se asociaron negativamente con el eje 1, y pH (H₂O), pH (KCl) y Dap, que lo hicieron en forma positiva.

La disminución, hacia el este, de las precipitaciones y del aporte de cenizas desde los volcanes de Chile ha influido sobre la génesis y propiedades de los suelos ya que se halló una relación positiva entre el eje 1 del PCA y la longitud (Figura 3). Las propiedades de los suelos variaron en forma continua, observándose un aumento en pH (NaF), carbono orgánico y capacidad de retención hídrica y una disminución de pH (H₂O), pH (KCl) y densidad aparente desde los suelos de régimen xérico de la estepa ubicados en el este de la región hacia los suelos de régimen údico de bosque ubicados en el oeste.

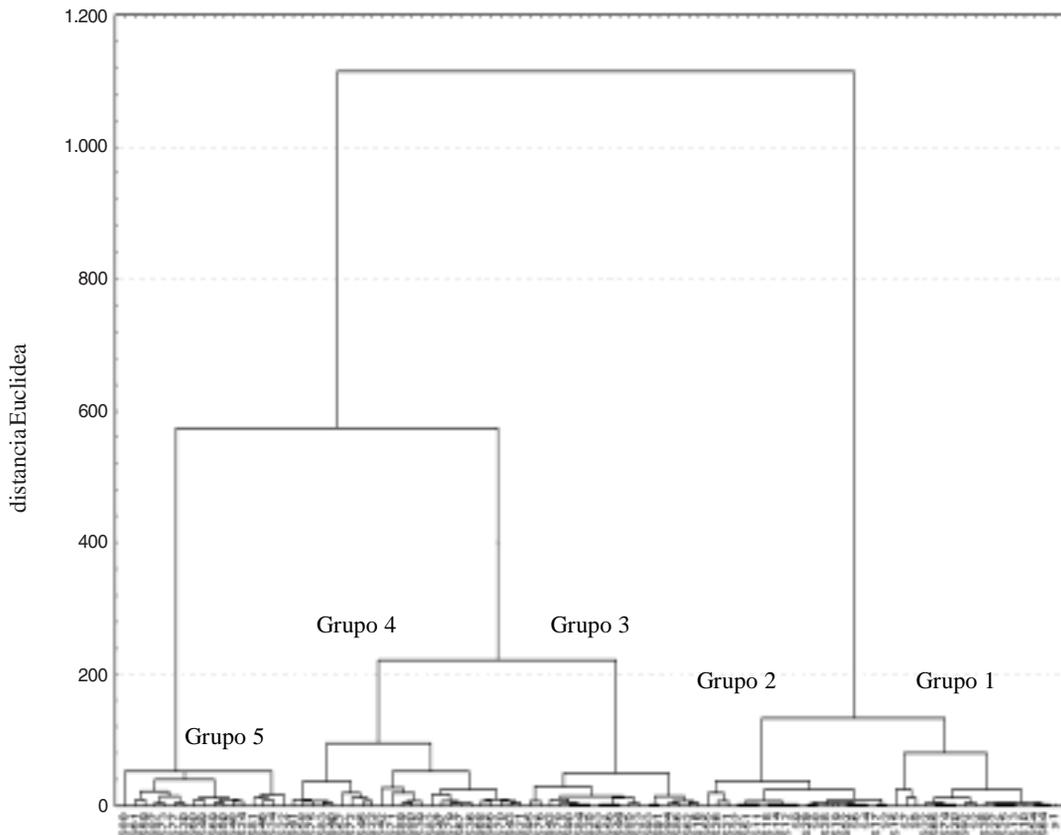


Figura 1. Dendrograma del análisis de cluster mostrando los cinco Grupos de suelos definidos.
Figure 1. Dendrogram of Cluster Analysis showing the five defined soil groups.

Tabla 1. Características (medias \pm desvío estándar) de los Grupos de suelos resultantes del análisis de clúster. Letras distintas entre Grupos para una misma variable indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). PMA = precipitación media anual. pH (NaF) = pH en NaF. pH (H₂O) = pH en agua. pH (KCl) = pH en KCl. Corg = carbono orgánico. Dap = densidad aparente. RHcc = retención hídrica a capacidad de campo. RH pmp = retención hídrica en punto de marchitez permanente.

Table 1. Characteristics (mean \pm standard deviation) of soils groups resulting of the cluster analysis. Different letters among groups for one variable indicates significant differences (Tukey, $p < 0.05$). PMA = mean annual precipitation. pH (NaF) = pH in NaF. pH (H₂O) = pH in water. pH (KCl) = pH in KCl. Corg = soil organic carbon. Dap = soil bulk density. RHcc = soil water at field capacity. RH pmp = soil water at wilting point.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Longitud	-71,01 \pm 0,26 a	-71,18 \pm 0,25 a	-71,45 \pm 0,26 b	-71,46 \pm 0,22 b	-71,52 \pm 0,16 b
Latitud	-40,28 \pm 1,46 a	-40,73 \pm 1,84 a	-40,74 \pm 1,24 a	-41,61 \pm 1,86 ab	-42,34 \pm 1,35 b
PMA (mm)	705,5 \pm 223,7 a	902,4 \pm 590,7 ab	1765,3 \pm 798,2 c	1341,7 \pm 474,7 bc	1329,4 \pm 559,6 bc
pH (NaF) ₁	8,73 \pm 0,86 a	9,09 \pm 1,08 ab	9,86 \pm 0,61 bc	9,82 \pm 0,87 c	10,14 \pm 0,62 c
pH (NaF) ₂	8,70 \pm 0,86 a	9,20 \pm 1,09 a	10,16 \pm 0,54 b	10,22 \pm 0,64 b	10,37 \pm 0,46 b
pH (H ₂ O) ₁	6,56 \pm 0,34 a	6,51 \pm 0,50 a	6,05 \pm 0,57 bc	6,26 \pm 0,42 ab	5,78 \pm 0,50 c
pH (H ₂ O) ₂	6,71 \pm 0,56 a	6,67 \pm 0,42 a	6,22 \pm 0,49 b	6,51 \pm 0,42 ab	6,13 \pm 0,44 b
pH (KCl) ₁	5,52 \pm 0,47 a	5,55 \pm 0,32 a	5,20 \pm 0,52 ab	5,37 \pm 0,34 ab	5,11 \pm 0,34 b
pH (KCl) ₂	5,69 \pm 0,48 a	5,60 \pm 0,50 a	5,38 \pm 0,40 a	5,40 \pm 0,30 a	5,38 \pm 0,32 a
Corg ₁ (%)	1,52 \pm 0,80 a	2,03 \pm 0,74 a	4,02 \pm 1,37 b	5,38 \pm 2,21 b	6,97 \pm 2,45 c
Corg ₂ (%)	1,09 \pm 0,65 a	1,44 \pm 0,55 a	2,25 \pm 0,97 b	2,36 \pm 0,90 b	2,78 \pm 0,92 b
Dap ₁ (g·cm ⁻³)	1,00 \pm 0,14 a	0,97 \pm 0,15 a	0,75 \pm 0,10 b	0,70 \pm 0,10 b	0,59 \pm 0,09 c
Dap ₂ (g·cm ⁻³)	1,00 \pm 0,12 a	0,97 \pm 0,17 a	0,75 \pm 0,07 b	0,71 \pm 0,11 bc	0,61 \pm 0,08 c
RHcc ₁ (%)	15,56 \pm 3,74 a	20,74 \pm 3,80 b	33,59 \pm 5,37 c	47,56 \pm 5,06 d	63,22 \pm 7,49 e
RHcc ₂ (%)	14,59 \pm 3,92 a	26,73 \pm 9,09 b	29,37 \pm 3,96 b	40,45 \pm 9,56 c	60,58 \pm 8,70 d
RHpmp ₁ (%)	9,16 \pm 2,98 a	12,22 \pm 2,24 a	19,84 \pm 3,19 b	27,30 \pm 7,10 c	37,63 \pm 5,47 d
RHpmp ₂ (%)	8,44 \pm 1,47 a	15,15 \pm 4,73 b	16,42 \pm 2,70 b	21,55 \pm 4,19 c	34,46 \pm 5,64 d

₁ = 0-20 cm; ₂ = 30-60 cm

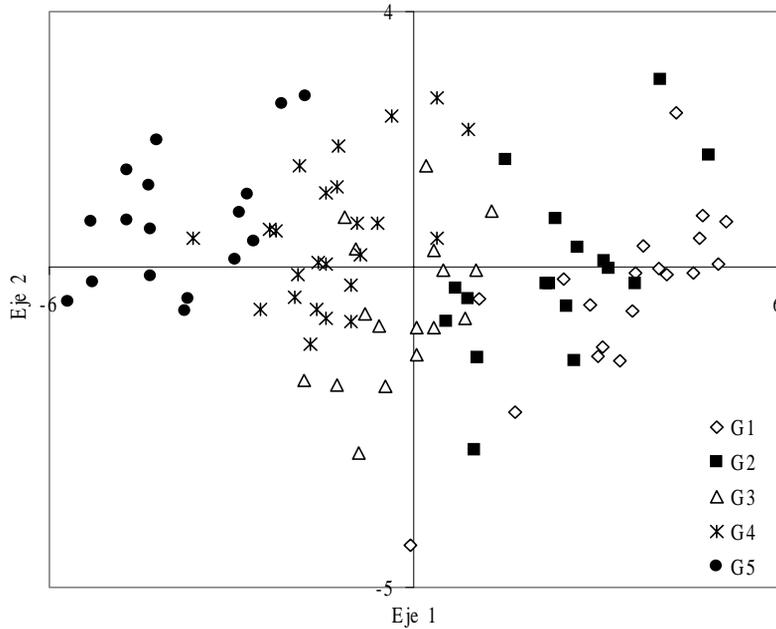


Figura 2. Ubicación de los perfiles de suelos, de acuerdo al Grupo al que pertenecen, en los primeros dos ejes del PCA.
 Figure 2. Location of soils profiles, according to their belong group, in the first two PCA axes.

Tabla 2. Autovectores, autovalores y varianza explicada por los primeros dos ejes del PCA. pH (NaF) = pH en NaF. pH (H₂O) = pH en agua. pH (KCl) = pH en KCl. Corg = carbono orgánico. Dap = densidad aparente. RHcc = retención hídrica a capacidad de campo. RH pmp = retención hídrica en punto de marchitez permanente.

Table 2. Eigenvectors, eigenvalues and variance explained by the first two PCA axes.

pH (NaF) = pH in NaF. pH (H₂O) = pH in water. pH (KCl) = pH in KCl. Corg = soil organic carbon. Dap = soil bulk density. RHcc = soil water at field capacity. RH pmp = soil water at wilting point.

	Eje 1	Eje 2
pH (NaF) ₁	-0,242	0,134
pH (NaF) ₂	-0,277	0,083
pH (H ₂ O) ₁	0,228	-0,359
pH (H ₂ O) ₂	0,211	-0,435
pH (KCl) ₁	0,190	-0,455
pH (KCl) ₂	0,164	-0,427
Corg ₁	-0,292	-0,126
Corg ₂	-0,259	-0,045
Dap ₁	0,314	0,069
Dap ₂	0,301	0,124
RHcc ₁	-0,319	-0,245
RHcc ₂	-0,276	-0,303
RHpmp ₁	-0,320	-0,148
RHpmp ₂	-0,291	-0,238
Autovalor	7,85	1,88
Varianza (%)	56,0	13,4

₁ = 0-20 cm; ₂ = 30-60 cm

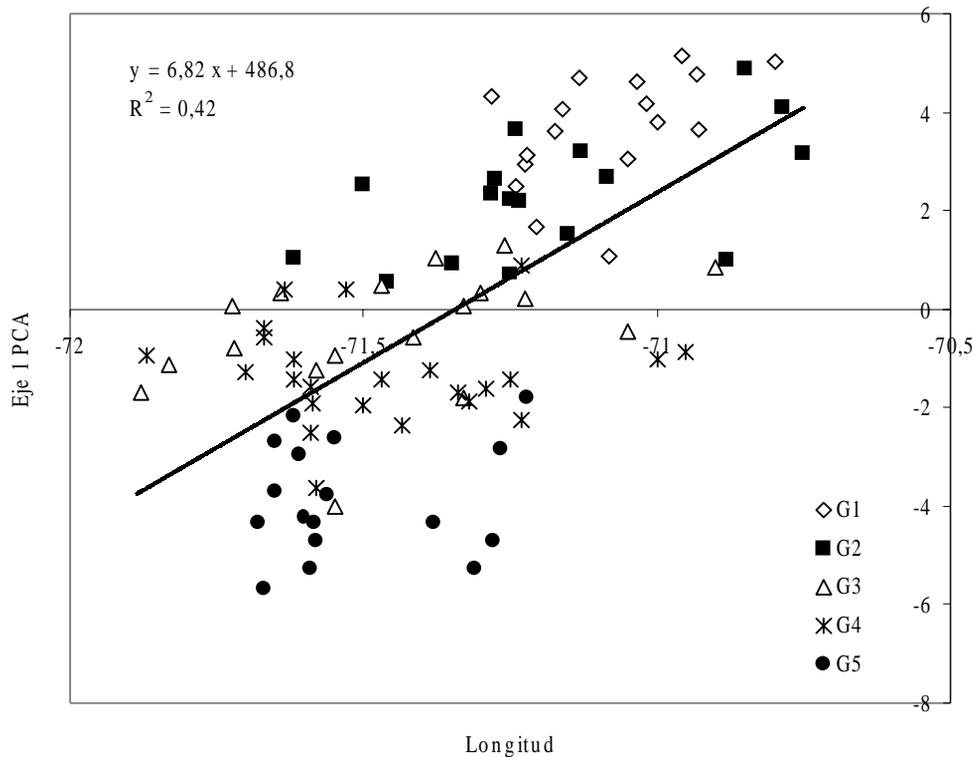


Figura 3. Relación entre la longitud y la posición de los perfiles de suelo en el eje 1 del PCA.

Figure 3. Relationship between longitude and soils profiles position of the PCA axis 1.

Relaciones entre variables

Se observó una fuerte asociación entre las variables analizadas, ya que de los 136 pares posibles de combinaciones 126 (93%) se correlacionaron significativamente con $p < 0,05$; 115 (85%) con $p < 0,01$ y 95 (70%) con $p < 0,001$ (Tabla 3). Las relaciones entre las variables se explican individualmente a continuación:

pH (NaF)

El pH (NaF) en los primeros 20 cm del suelo se relacionó negativamente con la longitud, indicando que los mayores valores se encuentran hacia el oeste. En la capa de 30 a 60 cm además de la longitud, la precipitación media anual contribuyó significativa y positivamente al modelo (Tabla 4). El método de determinación del pH (NaF) fue desarrollado por Fieldes y Perrot (1966) y es utilizado como indicador del contenido de minerales no cristalinos. Este test se basa en la observación de Egawa *et al.* (1960) sobre la propiedad de los alófanos de producir una

reacción alcalina con fluoruro de sodio. Esto se debe a que estos minerales poseen una elevada cantidad de grupos hidroxilo cuya presencia puede ser testeada a través de una reacción de intercambio con aniones fluoruro. Los valores de pH medido en NaF 1 N, superiores a 9,4 indican la presencia de alófanos y de complejos de sustancias orgánicas con aluminio activo (amorfo). Spaargaren (1994) sugirió realizar esta prueba para reconocer suelos volcánicos a campo, sin embargo los valores son cualitativos ya que otros tipos de suelo también reaccionan al NaF por la presencia de aluminio intercambiable y de sustancias no cristalinas, por lo que esta prueba no está considerada como criterio para identificar Andisoles (Ping *et al.*, 1989; Shoji *et al.*, 1993; Nizeyimana, 1997).

La relación negativa entre el pH (NaF) con la longitud y positiva con la precipitación media anual se debería a que el régimen de humedad tiene una influencia importante sobre los procesos de formación de minerales no cristalinos. Bajo condiciones de régimen de humedad údico predomina la formación de minerales no cristalinos, mientras que bajo condiciones más xéricas se promueve la formación de minerales cristalinos, en tal sentido Parfitt

Tabla 3. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de ubicación, edáficas y la precipitación media anual del sitio. * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001. Long = longitud. Lat = latitud. PMA= precipitación media anual. pH (NaF) = pH en NaF. pH (H₂O) = pH en agua. pH (KCl) = pH en KCl. Corg = carbono orgánico. Dap = densidad aparente. RHcc = retención hídrica a capacidad de campo. RH pmp = retención hídrica en punto de marchitez permanente.

Table 3. Pearson's correlation matrix among location, soil variables and site mean annual precipitation. * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. Long = longitude. Lat = latitude. PMA= mean annual precipitation. pH (NaF) = pH in NaF. pH (H₂O) = pH in water. pH (KCl) = pH in KCl. Corg = soil organic carbon. Dap = soil bulk density. RHcc = soil water at field capacity. RH pmp = soil water at wilting point.

	Long.	Lat.	PMA	pH (NaF) ₁	pH (NaF) ₂	pH (H ₂ O) ₁	pH (H ₂ O) ₂	pH (KCl) ₁	pH (KCl) ₂	Corg ₁	Corg ₂	Dap ₁	Dap ₂	RHcc ₁	RHcc ₂	RHpmp ₁	RHpmp ₂
Long.	1,00																
Lat.	0,53 ***	1,00															
PMA	-0,62 ***	0,15	1,00														
pH (NaF) ₁	-0,45 ***	-0,24 *	0,32 **	1,00													
pH (NaF) ₂	-0,54 ***	-0,18	0,49 ***	0,87 ***	1,00												
pH (H ₂ O) ₁	0,35 ***	0,08	-0,39 ***	-0,49 ***	-0,53 ***	1,00											
pH (H ₂ O) ₂	0,20 *	0,00	-0,31 **	-0,51 ***	-0,53 ***	0,80 ***	1,00										
pH (KCl) ₁	0,22 *	0,01	-0,24 *	-0,32 **	-0,30 **	0,56 ***	0,49 ***	1,00									
pH (KCl) ₂	0,22 *	0,04	-0,18	-0,24 *	-0,28 **	0,32 **	0,44 **	0,72 ***	1,00								
Corg ₁	-0,43 ***	-0,24 *	0,30 **	0,36 ***	0,54 ***	-0,35 ***	-0,33 **	-0,38 ***	-0,37 ***	1,00							
Corg ₂	-0,38 ***	-0,17	0,33 **	0,35 ***	0,49 ***	-0,37 ***	-0,32 **	-0,39 ***	-0,36 ***	0,75 ***	1,00						
Dap ₁	0,62 ***	0,34 **	-0,46 ***	-0,56 ***	-0,65 ***	0,41 ***	0,41 ***	0,41 ***	-0,71 ***	-0,63 ***	1,00						
Dap ₂	0,68 ***	0,40 ***	-0,47 ***	-0,54 ***	-0,64 ***	0,42 ***	0,38 ***	0,32 **	-0,64 ***	-0,57 ***	0,93 ***	1,00					
RHcc ₁	-0,57 ***	-0,44 ***	0,31 **	0,48 ***	0,59 ***	-0,41 ***	-0,32 **	-0,29 **	0,83 ***	0,63 ***	-0,79 ***	-0,76 ***	1,00				
RHcc ₂	-0,54 ***	-0,39 ***	0,25 *	0,43 ***	0,48 ***	-0,37 ***	-0,25 *	-0,20 *	0,57 ***	0,50 ***	-0,63 ***	-0,65 ***	0,82 ***	1,00			
RHpmp ₁	-0,48 ***	-0,39 ***	0,30 **	0,47 ***	0,61 ***	-0,49 ***	-0,42 ***	-0,38 ***	0,83 ***	0,61 ***	-0,76 ***	-0,73 ***	0,93 ***	0,71 ***	1,00		
RHpmp ₂	-0,48 ***	-0,37 ***	0,25 *	0,47 ***	0,52 ***	-0,44 ***	-0,36 ***	-0,29 **	0,62 ***	0,50 ***	-0,64 ***	-0,65 ***	0,82 ***	0,94 ***	0,80 ***	1,00	

₁ = 0-20 cm; ₂ = 30-60 cm

et al. (1983) y Chadwick *et al.* (2003) observaron que el contenido de minerales no cristalinos aumentó con el incremento de la precipitación y la lixiviación de bases a través del suelo. Además del régimen de humedad, otro factor que puede explicar el incremento de los valores de pH (NaF) hacia el Oeste de la región es su mayor cercanía a los volcanes chilenos y que, por lo tanto, probablemente han recibido mayor cantidad de cenizas a partir de las cuales se formaron los minerales no cristalinos:

$Al_0 + 0,5 Fe_0$

La relación entre el pH (NaF) y la presencia de minerales amorfos fue confirmada por la relación positiva con la suma del aluminio más la mitad del hierro extraídos con oxalato ácido ($Al_0 + 0,5 Fe_0$) (Tabla 4). Esta variable es

indicadora del contenido de minerales no cristalinos ya que considera el Al y Fe provenientes del alófono, imogolita, ferrihidrita y del acomplejado con sustancias húmicas (Parfitt y Wilson, 1985; Leamy *et al.*, 1988).

Retención de fosfatos

La capacidad de retención de fosfatos se relacionó positivamente con el pH (NaF) y la concentración de aluminio y hierro (Tabla 4). Los Andisoles poseen alta RP y esto constituye un importante criterio diagnóstico en estos suelos. De acuerdo a las relaciones observadas en el presente trabajo, el 85% de retención de fosfato exigido por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) para considerar a un suelo como Andisol, se obtuvo con valores de pH (NaF) superiores a 10,2 y de $Al_0 + 0,5 Fe_0$ mayores a 2,8%. La retención de fosfatos es causada por el Al y Fe activos presentes en el alófono, imogolita, com-

Tabla 4. Modelos de regresión entre las variables analizadas. Long = longitud. PMA = precipitación media anual. Al_0 = Al extraído con oxalato de amonio ácido. Fe_0 = Fe extraído con oxalato de amonio ácido. RP = retención de fosfatos. pH (NaF) = pH en NaF. pH (H_2O) = pH en agua. pH (KCl) = pH en KCl. Corg = carbono orgánico. Dap = densidad aparente. RHcc = retención hídrica a capacidad de campo. RHpmp = retención hídrica en punto de marchitez permanente.

Table 4. Regression models among the analyzed variables. Long = longitude. PMA = mean annual precipitation. Al_0 = acid ammonium oxalate extractable Al. Fe_0 = Acid ammonium oxalate extractable Fe. RP = phosphorus retention. pH (NaF) = pH in NaF. pH (H_2O) = pH in water. pH (KCl) = pH in KCl. Corg = soil organic carbon. Dap = soil bulk density. RHcc = soil water at field capacity. RHpmp = soil water at wilting point.

Modelo de regresión	R ²	p
$pH (NaF)_1 = -1,45 Long - 94, 21$	0,21	<0,00000
$pH (NaF)_2 = -1,28 Long + 0,0004 PMA - 82,18$	0,33	<0,00000
$Al_0 + 0,5 Fe_0 = 0,00006 pH (NaF)^{4,56}$	0,64	<0,00000
$RP = 39,27 Ln (Al_0 + 0,5 Fe_0) + 45,86$	0,82	<0,00000
$RP = 25,39 pH (NaF) - 173,81$	0,77	<0,00000
$pH (H_2O)_1 = - 0,00019 PMA - 0,198 pH (NaF)_1 - 0,031 Corg_1 + 8,48$	0,32	<0,00000
$pH (H_2O)_2 = - 0,000052 PMA - 0,239 pH (NaF)_2 - 0,034 Corg_2 + 8,91$	0,29	<0,00000
$pH (KCl)_1 = 0,387 pH (H_2O)_1 - 0,352 Corg_1 + 3,08$	0,35	<0,00000
$pH (KCl)_2 = 0,300 pH (H_2O)_2 - 0,099 Corg_2 + 3,76$	0,25	<0,00000
$Corg_1 = -2,90 Long + 0,572 pH (NaF)_1 - 207,93$	0,22	<0,00000
$Corg_2 = 0,500 pH (NaF)_2 + 0,91$	0,24	<0,00001
$Dap_1 = - 0,71 pH (NaF)_1 - 0,043 Corg_1 + 1,65$	0,61	<0,00000
$Dap_2 = - 0,092 pH (NaF)_2 - 0,06 Corg_2 + 1,82$	0,50	<0,00000
$RHcc_1 = 3,69 Corg_1 - 38,04 Dap_1 + 51,94$	0,77	<0,00000
$RHcc_2 30-60 = 3,25 Corg_2 - 48,17 Dap_2 + 66,57$	0,45	<0,00000
$RHpmp_1 = 2,49 Corg_1 - 19,92 Dap_1 + 27,24$	0,75	<0,00000
$RHpmp_2 = 1,79 Corg_2 - 26,64 Dap_2 + 36,98$	0,45	<0,00000

$_1$ = 0-20 cm; $_2$ = 30-60 cm

plejos Al-humus y ferrihidrita; por lo tanto RP depende del contenido de estos componentes (Wada y Gunjigake, 1980; Wada, 1985; Shoji *et al.*, 1993).

Acidez

En las mediciones de pH de suelo se diferencia entre acidez actual, que es la concentración de H^+ en la solución del suelo, y acidez potencial, que incluye el H^+ adsorbido en el complejo coloidal. Generalmente, la acidez actual se determina en agua y la potencial en KCl (Mengel y Kirkby, 2000). El pH (H_2O) se relacionó negativamente con la precipitación media anual, el pH (NaF) y el carbono orgánico en ambas capas del suelo. El pH (KCl) se relacionó positivamente con el pH (H_2O) y negativamente con el carbono orgánico en ambas capas del suelo (Tabla 4).

La acidez del suelo está determinada por varios componentes, en los suelos de origen volcánico las concentraciones de Corg y de minerales no cristalinos son dos de los más importantes (Nanzzyo *et al.*, 1993). La acidez del suelo tiende a elevarse al aumentar Corg debido a la influencia de los grupos carboxilos de los ácidos orgánicos. Broquen *et al.* (2005) observaron que el pH (NaF) fue la variable que mejor explicó la variación del pH (H_2O) y lo atribuyeron al efecto de la actividad del Al sobre la acidez del suelo. Otro factor que influye sobre el pH (H_2O) del suelo es la pluviometría del sitio. Al aumentar las precipitaciones aumenta la lixiviación de cationes básicos y, por lo tanto, la proporción de H^+ en el complejo de intercambio del suelo (Sadzawka y Carrasco, 1985), esto explicaría la disminución del pH (H_2O) con las precipitaciones. Relaciones similares entre pH (H_2O) y las precipitaciones fueron observadas por Broquen *et al.* (2005) en 5 sitios de una secuencia bioclimática en el sudoeste de la provincia de Neuquén.

Shoji y Fujiwara (1984) observaron que la formación de minerales no cristalinos es inhibida a pH (H_2O) menores a 4,9. A esos valores de pH (H_2O), el aluminio forma complejos Al-humus y no queda disponible para combinarse con silicio y formar minerales no cristalinos. Debido a esto Nanzzyo *et al.* (1993) distinguieron entre Andisoles alofánicos y no alofánicos, en estos últimos la fracción arcilla está dominada por minerales cristalinos y poseen valores de pH (H_2O) inferiores a 5. En el presente estudio todos los valores de pH (H_2O) fueron superiores a 5, indicando que se trata de suelos alofánicos.

Según Mekaru y Uehara (1972) la diferencia entre pH (KCl) y pH (H_2O) define el tipo de carga neta del sistema coloidal. En el presente estudio los valores de pH (KCl) fueron, en todos los casos, inferiores a los de pH (H_2O) indicando que predomina carga neta negativa.

Carbono orgánico

En general, el elevado contenido de Corg de los Andisoles se atribuye a la formación de complejos estables de sustancias húmicas con aluminio, hierro y constituyentes no cristalinos que los protegen de la degradación microbiana (Wada, 1980, 1989; Shoji *et al.*, 1990, 1993; Nizeyimana, 1997). Sin embargo las relaciones entre Corg y el pH (NaF) fueron débiles (Tabla 4). En los sitios donde se hallan ecosistemas dominados por estepas gramíneas y gramíneo-arbustivas (Grupos 1 y 2) los mayores aportes de Corg lo realizan las raíces, por lo tanto la disminución en profundidad es más gradual. En cambio en los suelos bajo bosque (Grupos 3, 4 y 5) el mayor aporte de Corg se produce desde la superficie (Kononova, 1982), por lo tanto la disminución en profundidad es más acentuada.

Densidad aparente

La densidad aparente se relacionó en forma negativa con el pH (NaF) y el carbono orgánico en las dos capas del suelo (Tabla 4). De acuerdo a la U.S. Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) uno de los requisitos para considerar a un suelo como perteneciente al orden de los Andisoles es que su Dap sea inferior a $0,80 \text{ g cm}^{-3}$. Este requisito se verificó en los Grupos 3, 4 y 5. Las relaciones entre Dap y las concentraciones de Corg y de minerales no cristalinos fueron similares a las halladas por Nanzzyo *et al.* (1993) y Arnalds (2004). Los suelos originados a partir de cenizas volcánicas poseen una densidad de partícula de $2,5$ a $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ (Bielders *et al.*, 1990), al igual que otros tipos de suelos minerales, por lo tanto la baja Dap se debería al efecto del Corg y de los alófanos que contribuyen al desarrollo de una estructura porosa.

Capacidad de retención hídrica

La retención hídrica a capacidad de campo y en punto de marchitez permanente en ambas capas del suelo se relacionó positivamente con el carbono orgánico y negativamente con la densidad aparente (Tabla 4). Según Nanzzyo *et al.* (1993), la elevada capacidad de retención de humedad de los suelos derivados de cenizas volcánicas se debe a que poseen una estructura de agregados estables, que determina un gran volumen de meso y microporos, y cuya formación es promovida por el alto contenido de Corg y de minerales no cristalinos. Estos minerales contribuyen a la retención de agua debido a su tamaño de partícula pequeño y a su estructura esférica.

rica que permite a las moléculas de agua ingresar en los poros intra e inter-esferas.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman la existencia, en el sector central y norte de la región Andinopatagónica, de un gradiente de desarrollo de características ándicas hacia el oeste, como resultado de tres procesos pedogenéticos dominantes: formación de minerales amorfos, acumulación de materia orgánica y la formación de complejos arcillo-húmicos. Estos procesos determinan las características particulares que se encontraron asociadas con la longitud [mayor pH (NaF), carbono orgánico y retención hídrica y menor pH (H₂O), pH (KCl) y densidad aparente de este a oeste].

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra María Julia Mazzarino por sus valiosos comentarios sobre este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnalds, O. 2004. Volcanic soils of Iceland. *Catena* 56: 3-20.
- Barros, V; V Cordon; CL Moyano; RJ Mendez; JC Forquera & O Pizzio. 1983. Cartas de precipitaciones del oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. Primera contribución. Facultad de Ciencias Agrarias, UNC-CENPAT-CONICET. 100p.
- Besoain, E. 1985. Los suelos. Pp. 25-95 *En: Toso, J (ed.)*. Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Bielders, CL; LW De Backer & B Delvaux. 1990. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 822-826.
- Blakemore, LC; PL Searle & BK Daly. 1981. Methods for chemical analysis of soils. New Zeland Soil Bureau Scientific Report 10^a. Departament of Scientific and Industrial Research, New Zeland.
- Broquen P; F Candan; JC Lobartini & JL Girardin. 2004. Relaciones entre el carbono orgánico y propiedades edáficas y del sitio en suelos derivados de cenizas volcánicas, sudoeste de Neuquén (Argentina). *Ciencia del Suelo* 22: 73-82.
- Broquen P; JC Lobartini; F Candan & G Falbo. 2005. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* 129: 167-177.
- Chadwick OA; RT Gavenda; EF Kelly; K Ziegler; CG Olsson; EW Crawford & DM Hendricks. 2003. The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chemical Geology*: 1-29.
- Colmet Daage, F; A Marcolin; CR Lopez; ML Lanciotti; JA Ayesa; DE Bran; *et al.* 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia, INTA-ORSTOM. Bariloche. Argentina. 39 pp
- Colmet Daage, F; ML Lanciotti & A Marcolín. 1995. Importancia forestal de los suelos volcánicos de la Patagonia Norte y Central. Comunicación Técnica N° 28, Suelos. INTA, EEA Bariloche. 28 p.
- del Valle, HF. 1998. Patagonian soils: a regional synthesis. *Ecología Austral* 8: 103-123.
- Egawa, T; A Sato & T Nishimura. 1960. Release of OH ions from clays minerals treated with various anions. with special reference to the structure and chemistry of allophane. *Adv. Clay. Sci.* 2: 252-262.
- Fieldes, M & KW Perrot. 1966. The nature of Allophane in soils. 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zeal. J. Sci.* 9: 623-629.
- Jackson, ML. 1964. Análisis químico de Suelos. 3° Ed. Omega. Barcelona, Pp. 622.
- Kleber, M; C Mikutta & R Jahn. 2004. Andosols in Germany—pedogenesis and properties. *Catena* 56: 67-83.
- Kononova, MM. 1982. Materia orgánica del suelo. Oikos Tau. Barcelona. 365 p.
- López, C; F Colmet Daage & FH Planas. 1993. Aportes de los volcanes de la cordillera Andino-Patagónica a los suelos argentino-chilenos, entre los paralelos 42° y 44° S. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza.
- Mekaru, T & G Uehara. 1972. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. *Soil Sci. Am. Proc.* 36: 296-300.
- Mengel, K & EA Kirkby. 2000. Principios de nutrición vegetal. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea. Suiza. 607 p.
- Muñoz, E. 1985. Relevamiento integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro. Comunicación Técnica N° 14, Agrometeorología. INTA, EEA Bariloche.
- Nanzyo, M; S Shoji & RA Dahlgren. 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. *In: S Shoji; M Nanzyo & RA Dahlgren (eds.)*, Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science. Elsevier, Amsterdam, pp. 189-207.
- Nizeyimana, E. 1997. A toposequence of soils derived from volcanic materials in Rwanda: Morphological, chemical and physical properties. *Soil Sci.* 162: 350-360.
- Parfitt, RL; M Russell & GE Orbell. 1983. Weathering sequence of soil from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma* 29: 41-57.
- Parfitt, RL & AD Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *Catena. Supplement* 7: 1-8.
- Ping, CL; S Shoji; T Ito; T Takahashi & JP Moore. 1989. Characteristics and classification of volcanic-ash-derived soils in Alaska. *Soil Sci.* 148: 8-29.

- Sadzawka, MA & MA Carrasco. 1985. Química de los suelos volcánicos. Pp. 337-397 *En: J Toso, (ed.)*. Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Ministerio de Agricultura. Santiago. Chile.
- Shoji, S; M Nanzyo & RA Dahlgren. 1993. Volcanic ash soil: Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 288 p.
- Spaargaren (*ed.*). 1994. World reference base for soil resources. ISRIC/FAO, Wageningen/Rome.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for making and Interpreting Soil Surveys. *Agric. Handbook No. 436*, 2nd. Edition. SCS-USDA. US Govern. Printing Office Washington, D.C.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andisols. *Adv. Soil Sci.* 2: 173-229.
- Wada, K. 1980. Mineralogical characteristics of Andosols. pp. 87-107. *In: Theng BKG (ed.)*. Soils with variable charge. N. Z. Soc. Soil Sci. Bureau, Dept. Scient. Ind. Res. Lower Hutt, New Zealand.
- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. pp. 1051-1081. *In: GB Dixon & SB Wedd (eds.)*. Minerals in soil environments. SSSA, Madison, WI.